

***А. В. Левина, К. Д. Вахонина, Н. Н. Озерец, Т. В. Мальцева,
Л. А. Мальцева****

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

**mla44@mail.ru*

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЗАГОТОВКИ БОЛЬШИХ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

В работе изучено влияние комбинированной деформационной обработки, сочетающей в себе равноканальное угловое прессование с последующим формоизменением (волочением) до нужного типоразмера, на эволюцию структуры и механические свойства метастабильной аустенитной стали.

Ключевые слова: аустенит, легирование, упрочнение, механические свойства, высокая прочность.

A. V. Levina, K. D. Vakhonina, N. N. Ozerets, T. V. Maltseva, L. A. Maltseva

THE TECHNOLOGY OF OBTAINING HIGH-STRENGTH BILLET OF LARGE CROSS SECTIONS FOR ELASTIC ELEMENTS OF METASTABLE AUSTENITIC STEEL

The authors studied the effect of combined deformation processing, which combines equal channel angular pressing with subsequent forming (drawing) to the desired size, structure evolution and mechanical properties of metastable austenitic steel.

Keywords: austenite, alloying, hardening, mechanical properties, thermal analysis, high strength.

Специфика получения высокопрочных изделий из проволоки и ленты из метастабильных аустенитных сталей предусматривает осуществление высоких степеней холодной пластической деформации, и чем выше пластичность и технологичность используемых сталей, тем больше достигаемый эффект упрочнения. Так в исследуемой стали 03X14H11K5M2ЮТ при использовании холодной пластической деформации волочением $\epsilon \sim 4.0$ было получено увеличение прочностных свойств более чем в четыре раза. Однако при производстве высокопрочной проволоки больших и средних сечений применение высоких суммарных степеней обжатия нецелесообразно, так как диаметр исходной горячекатаной заготовки имеет свои ограничения (8,0 мм или 6,0 мм),

а использование холодной пластической деформации приводит к уменьшению сечения проволоки.

В настоящее время многие известные ученые решают задачу повышения прочностных свойств в 2–3 раза за счет получения субмикроскопической структуры. Так использование равноканального углового прессования является одним из широко применяемых методов интенсивной пластической деформации, приводящих к повышению прочностных свойств за счет образованию субмикрокристаллического состояния. В данной работе для производства высокопрочной проволоки больших и средних сечений была предложена комбинированная деформационная обработка, сочетающая в себе равноканальное угловое прессование (РКУП), позволяющее упрочнять металл без изменения поперечного сечения заготовки за счет деформации сдвигом высокой интенсивности, с последующим формоизменением (волочением) до нужного типоразмера при температуре ниже температуры рекристаллизации обрабатываемого металла.

Деформация образцов диаметром 10,0 мм и длиной 60,0 мм осуществлялась по маршруту B_c за 4 и 6 проходов, что соответствует истинной деформации $e \approx 2,7$ и $e \approx 4,0$.

EBSD-анализ подвергнутых РКУП образцов не показал четкой картины ориентировок зерен по причине высокой деформированности и напряженности структуры. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии выраженной текстуры. Анализ позволил оценить измельчение зерна с увеличением количества проходов: от 1–3 мкм при 4 проходах к 0,5–1 мкм при 6. Зерна в структуре после 6 проходов неравноосные.

При 6 проходах доля большеугловых границ между элементами структуры выше по сравнению с 4 проходами (23,3 % против 12,5 % БУГ). Данные показатели подтверждают факт протекания процесса частичной динамической рекристаллизации и наличия в зеренно-субзеренной структуре исследуемой стали после шести проходов большого количества рекристаллизованных зерен.

Электронно-микроструктурные исследования показали, что структура после РКУП ориентирована с размером элементов 100–250 нм. В процессе многократно повторяющихся прессований при температуре 400 °С в заготовке накапливается деформация сдвигом, что приводит к образованию ультрамелкозернистой структуры. Расшифровка картин микродифракции и темнопольные изображения исследуемой стали при увеличении числа проходов РКУП с 4 до 6 подтвердили, что сохраняется однофазная аустенитная сильнодеформированная структура.

Холодная пластическая деформация волочением после РКУП позволила упрочненную заготовку диаметром 10 мм и длиной около 60 мм дополнительно деформировать при комнатной температуре с уменьшением поперечного сечения до заданного диаметра проволоки будущей

пружины (3,8 мм), а также повысить прочностные показатели за счет наклепа, получения субмикrokристаллической структуры и протекания полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения.

Частичное протекание процессов динамической рекристаллизации при волочении проволоки становится возможным по нескольким причинам: самая главная – применение столь высоких степеней холодной пластической деформации (суммарная величина деформации составляла $e \approx 4,64$ после 4 проходов РКУП + волочение и $e \approx 5,94$ после 6 проходов РКУП + волочение) снижают температуру рекристаллизации.

Как показал *EBSD*-анализ стали 03X14H11K5M2ЮТ, после 4 проходов РКУП и волочения образец не имеет текстуры, его структура двухфазная, углу разориентировки более 15° соответствует примерно 60 % границ (БУГ). В структуре стали (ПЭМ) после РКУП и волочения, вне зависимости от числа проходов при РКУП, наблюдали многочисленные рекристаллизованные зерна округлой и овальной формы размером 150–200 нм. В то же время факт протекания частичной динамической и постдинамической рекристаллизации подтверждается и хорошо различимыми отдельными точечными рефлексами без азимутального размытия. На картинах микродифракции в отдельных участках прослеживается направленность роста новых зерен от границ элементов исходной структуры. Ориентированные элементы структуры превратились в равноосные за счет образования дислокационных перемычек, а рост угла разориентировки привел к образованию новых зерен. Возможно, при деформации (волочении) увеличивается число дефектов, в том числе точечных, которые ускоряют диффузионные процессы, протекающие при рекристаллизации.

Обычно при волочении в данных сталях при аналогичной величине суммарного обжатия наблюдается более значительный ТРИП-эффект (до 80 % мартенсита деформации образуется при деформации волочением закаленной исходной заготовки), в то время как волочение субмикrokристаллической структуры после РКУП приводит к образованию только 35 % мартенсита деформации

Результаты испытаний на сжатие цилиндрических образцов свидетельствуют о том, что исследуемые стали после интенсивной пластической деформации обладают не только высокой прочностью ($\sigma_{0,2}^{сж} = 1150\text{--}1230$ МПа), но и хорошей пластичностью, которую оценивали по уширению образца на равномерной стадии пластического течения ($\eta_{равн}^{сж} = 19\text{--}28$ %). Старение при 500°C приводит к изменению механического поведения исследуемых сталей: кривые сжатия состаренных образцов лежат выше кривых сжатия деформированных образцов во всем диапазоне деформации (так, $\sigma_{0,2}^{сж}$ возрастает на 700–800 МПа), на кривых появляется площадка текучести, образцы

разрушаются после потери устойчивости пластического течения при сохранении достаточно высокой пластичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006 и НИР № 2014/236 на выполнение Госработ в сфере научной деятельности в рамках базовой части Госзадания № 2480 Минобрнауки РФ.